DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260127005
引用格式: 李旭, 胡谦, 邢冉冉, 等. 不同产地即食和淡干海参品质比较及综合评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 71–83.
LI X, HU Q, XING RR, *et al*. Comparison of the quality and comprehensive evaluation of ready-to-eat and dried *Apostichopus japonicus* from different origins [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 71–83. (in Chinese with English abstract).

不同产地即食和淡干海参品质比较及综合评价

李 旭[1,2], 胡 谦[1], 邢冉冉[1], 张晓波[3,4], 李振兴[2], 张九凯[1*], 曹际娟[3,4*], 陈 颖[1]

(1. 中国质量检验检测科学研究院, 北京 100176; 2. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 青岛 266003;
3. 大连星海湾实验室, 大连 116034; 4. 大连民族大学生命科学学院, 大连 116600)

摘 要: 目的 客观比较“北参南养”产业模式下经历产地变迁的海参(*Apostichopus japonicus*)和大连本土生长海参的品质特征, 并进行品质综合评价。**方法** 选取大连本土海参与福建“北参南养”海参为研究对象, 以即食及淡干两种主流加工形态为样本载体, 通过理化全谱分析、感官评价及营养组分分析, 结合多变量统计分析方法, 系统揭示不同产地海参的品质差异及其物质基础。**结果** 产地环境显著塑造了两类海参的营养特征: 大连海参在“脂质品质与氨基酸组成”方面表现出显著优势, 其二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)含量及必需氨基酸/总氨基酸(essential amino acids/total amino acids, EAA/TAA)显著高于福建海参, 且动脉硬化指数(atherogenic index, AI)较低; 而福建“北参南养”海参则在“功能活性成分”积累上具有明显特征, 其海参多糖、海参皂苷及总糖含量相对较高。关联性分析揭示, *n*-3 多不饱和脂肪酸的富集赋予了大连海参特有的清新“青草香”, 而皂苷与糖类的积累则形成了福建海参醇厚的“油脂香”。层次聚类分析(hierarchical clustering analysis, HCA)结果显示, 基于筛选出的 10 个核心营养理化指标可将所有样品准确聚类为四大簇, 有效识别了产地与加工方式的特征差异。基于主成分分析(principal component analysis, PCA)的综合评价模型进一步证实, 两类海参在营养组成上呈现出显著的“产地特异性”差异。**结论** 本研究从化学物质基础层面阐明了“北参南养”导致的品质差异变化规律, 揭示了大连海参以优质脂质与蛋白质为特征, 而福建海参以多糖与皂苷等活性物质富集为特征的产地差异, 为海参产业的品质科学评价、产品的差异化定位及精深加工提供了重要的理论依据。

关键词: 海参; “北参南养”; 层次聚类分析; 主成分分析; 营养品质

Comparison of the quality and comprehensive evaluation of ready-to-eat and dried *Apostichopus japonicus* from different origins

LI Xu[1,2], HU Qian[1], XING Ran-Ran[1], ZHANG Xiao-Bo[3,4], LI Zhen-Xing[2], ZHANG Jiu-Kai[1*], CAO Ji-Juan[3,4*], CHEN Ying[1]

收稿日期: 2026-01-27
基金项目: 大连星海湾实验室示范性项目(DLjswsf202403)
第一作者: 李旭(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品品质识别及产地溯源。E-mail: lixu2022@stu.ouc.edu.cn
***通信作者:** 张九凯(1986—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品真实性鉴别及品质识别。E-mail: zhjk_caiq@163.com
曹际娟(1968—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品分子检测与分子营养。E-mail: caojijuan@dlnu.edu.cn

(1. *Chinese Academy of Quality and Inspection & Testing*, *Beijing* 100176, *China*; 2. *College of Food Science and Engineering*, *Ocean University of China*, *Qingdao* 266003, *China*; 3. *Dalian Xinghai Bay Laboratory*, *Dalian* 116034, *China*; 4. *College of Life Sciences*, *Dalian Minzu University*, *Dalian* 116600, *China*)

ABSTRACT: Objective To objectively compare the quality characteristics of *Apostichopus japonicus* cultivated under the "North-to-South cultivation" model (geographical translocation) versus those from the native Dalian habitat, and conduct a comprehensive quality evaluation. **Methods** Using the 2 kinds of dominant market forms—ready-to-eat and dried *Apostichopus japonicus*—from Dalian (native) and Fujian ("North-to-South cultivation") as research subjects, comprehensive physicochemical profiling, sensory evaluation and nutritional composition analysis were conducted. Multivariate statistical analysis was employed to systematically elucidate the quality differentiation and its material basis between *Apostichopus japonicus* from different origins. **Results** The geographical environment significantly reshaped the nutritional profiles of the 2 groups. Dalian *Apostichopus japonicus* exhibited superior lipid quality and amino acid composition, characterized by significantly higher content of eicosapentaenoic acid (EPA), docosahexaenoic acid (DHA) and essential amino acids/total amino acids (EAA/TAA), accompanied by a lower atherogenicity index (AI) compared to Fujian *Apostichopus japonicus*. Conversely, Fujian "North-to-South cultivation" *Apostichopus japonicus* were distinguished by the accumulation of functional bioactive components, showing relatively higher levels of *Apostichopus japonicus* polysaccharides, saponins and total sugars. Correlation analysis revealed that the enrichment of *n*-3 polyunsaturated fatty acids contributed to the distinctive fresh "grassy" aroma of Dalian samples, while the accumulation of saponins and sugars formed the mellow "fatty" aroma of Fujian samples. Hierarchical clustering analysis (HCA), based on 10 screened core physicochemical indicators, accurately classified all samples into 4 distinct clusters, effectively identifying characteristic differences driven by origin and processing methods. A principal component analysis (PCA)-based comprehensive evaluation model further confirmed significant "origin-specific" differences in nutritional composition between the 2 groups. **Conclusion** This study elucidates the patterns of quality differentiation caused by the "North-to-South cultivation" model from the perspective of chemical material basis. It reveals distinct origin-based characteristics: Dalian *Apostichopus japonicus* are defined by high-quality lipids and proteins, whereas Fujian *Apostichopus japonicus* are characterized by the enrichment of bioactive substances such as polysaccharides and saponins. These findings provide a vital theoretical basis for scientific quality evaluation, product differentiation and deep processing strategies in the *Apostichopus japonicus* industry.

KEY WORDS: *Apostichopus japonicus*; "North-to-South cultivation"; hierarchical clustering analysis; principal component analysis; nutritional quality

0 引 言

海参(*Apostichopus japonicus*), 又称刺参, 是棘皮动物门(Echinodermata)中最具有重要经济与生物学价值的物种之一[1], 因其富含蛋白质、多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids, PUFA)以及海参多糖、海参皂苷[2]等独特的生物活性成分, 具有极高的营养滋补与药用价值[3]。据《2025 中国渔业统计年鉴》数据显示, 2024 年我国海参养殖总产量已达 32.6 万吨, 养殖产值超 400 亿元[4]。与此同时, 海参养殖产业已形成显著的南北地域分化格局。其中, 大连海域作为传统的海参产区之一, 主要采用底播或围堰养殖模式, 生长周期通常长达 3~5 年, 需经历多次冬眠与夏眠[5]。每年 11 月至次年 4 月北方水温过低, 大连海域海参进入休眠状态, 而南方如福建霞浦等海域水温适宜(约 10 ℃), 利于海参生长[6]。因此福建霞浦等地依托"北参南养"模式[7], 利用南方冬季温暖的海域环境进行吊笼和网箱养殖, 仅需 4~5 个月的育肥期即可达到上市规格, 显著缩短了生长周期并提升了产量[7]。这两种在产地环境、生长周期及养殖方式上截然不同的产业模式, 是否会导致海参最终品质存在显著差异, 一直受到业内和消费者的广泛关注[8]。

由于海参具有极易自溶的特性, 鲜活海参极难贮运, 市场上绝大多数海参产品以加工或者半加工形态流通[9]。其中, 即食海参和淡干海参是目前市场份额最大、消费者接受度最高的两种主流产品形式[10]。科学、客观地比较大

连本土生长的与福建“北参南养”的即食和淡干海参营养品质特征, 对于指导消费者理性选购以及规范海参产业及市场良性发展具有重要意义。海参的现有品质评价研究多集中于鲜活海参的多产地对比或者针对加工方式样品的对比。例如, 刘小芳[11]研究发现, 不同地域海参磷脂活性成分存在较大差异; 傅志宇等[10]对市售即食海参的分析表明, 不同加工工艺会导致海参胶原蛋白热稳定性及滋味特征产生显著差异, 且蛋白质含量波动范围可达 55%~69%。尽管前人已在鲜参或加工形态上进行过探索, 但针对同一样品在不同主流加工形态(即食和淡干)下的跨产地、跨模式的系统性横向对比研究仍相对较少。

鉴于此, 本研究选取具有代表性的大连本土养殖海参与福建“北参南养”海参为样品, 在严格控制工艺条件的前提下, 根据相关标准(SC/T 3308—2025《即食海参》及 GB 31602—2015《食品安全国家标准 干海参》)分别制备成即食海参与淡干海参。通过系统测定其感官特性、质构指标、基础理化组成(蛋白质、脂肪、灰分)、微量活性成分(海参皂苷、海参多糖)以及氨基酸和脂肪酸的精细图谱, 结合主成分分析(principal component analysis, PCA)、层次聚类分析(hierarchical clustering analysis, HCA)等多变量统计方法, 对两地海参进行综合品质差异分析和营养评价, 为海参产业的精细化分级与品质评价体系的构建提供科学的理论依据。

1　材料与方法

1.1　样品采集与加工

实验用鲜活海参(*Apostichopus japonicus*)于 2024 年 3—5 月分别采集自辽宁大连和福建霞浦海域。其中, 大连组样品采集点覆盖大连各个地理标志点包括大连金州区、普兰店区、瓦房店市、长海县以及南部海域, 涵盖底播增殖、围堰养殖及网箱养殖 3 种典型模式; 福建组样品采集自福建霞浦海域, 均为“北参南养”模式(即在大连海域培育苗种后转运至南方海域越冬养殖), 养殖方式包括网箱养殖和吊笼养殖。为确保样品的一致性与代表性, 制定严格的样本筛选标准: 挑选体表无伤、棘刺完整、处于非排脏期且规格相近[体质量(150±10) g, 体长约 20 cm]的成年海参[12]。样品采集后, 现场迅速去除内脏并用海水洗净, 置于干冰环境中冷冻保存, 统一运送至海参加工厂进行标准化加工。为真实模拟市场主流产品形态并消除加工过程中的主观偏差, 采用单盲法[13]对样品进行编码处理。各产地海参分别参考 SC/T 3308—2025 及 GB 31602—2015 标准工艺制备, 即食海参由原料经清洗后于 100 ℃沸水中漂烫 5 min, 随后在 100 ℃常压条件下蒸煮 60 min, 冷却后置于 0~4 ℃纯净水中浸泡 48 h(每 12 h 换水一次); 淡干海参由原料于 3.5%淡盐水中煮沸 40 min, 捞出沥干后采用冷风干燥至含水量低于 15%。加工完成后, 所有样品立即真空包装并置于−20 ℃冰箱中保存备用。

1.2　仪器与试剂

SP11Z007 组织研磨器(德国凯杰公司); Centrifuge 5910 Ri 台式离心机(德国艾本德公司); Thermo Scientific™ Hypersil GOLD™ C_{18} 色谱柱(250 mm× 4.6 mm, 5 μm)(美国赛默飞世尔科技公司); UV-6000 型紫外-可见分光光度计(上海元析仪器有限公司); K9860 型全自动凯氏定氮仪、SOX406 型粗脂肪测定仪(海能未来技术集团股份有限公司); LA8080 型全自动氨基酸分析仪(日本日立高新技术公司); Agilent6890N 型气相色谱仪、Agilent J&W DB-23 色谱柱(30 mm×0.25 mm, 0.25 μm)(美国安捷伦科技公司); Vanquish Core 高效液相色谱仪(海能未来技术集团股份有限公司); LGJ-10 型真空冷冻干燥机(北京松源华兴科技发展有限公司); CTX 型质构仪[美国博勒飞(Brookfield)公司]; PX124ZH 型万分之一电子天平(美国奥豪斯公司); SX2 型智能箱式马弗炉(河南奥菲达仪器设备有限公司); DHG 系列电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)。

37 种脂肪酸甲酯混合标准品(纯度≥99%, 美国 TMstandard 公司); 16 种氨基酸混合标准品(浓度 100 nmol/mL, 江苏坛墨质检科技股份有限公司); 十一碳酸甘油三酯内标、喹诺酮标准品(纯度≥98%, 美国 Sigma-Aldrich 公司); 盐酸(浓度≥36%, 优级纯)、苯酚(分析纯)、柠檬酸钠、氢氧化钠(优级纯)(国药集团化学试剂有限公司); 1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(纯度≥99%)、三氟化硼-甲醇溶液(浓度 15%)、甲醇、乙腈、正丁醇、三氯甲烷、三氟乙酸、正庚烷、异辛烷(色谱纯)、盐酸、硫酸、硼酸、氢氧化钠、乙二胺四乙酸、氢氧化钾、硫酸铜、乙酸钾、硫酸钾、石油醚(沸程 30~60 ℃)、无水乙醚、无水硫酸钠、磷酸二氢钾、硫酸氢钠、焦性没食子酸、甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂、亚甲基蓝指示剂、乙醚、氨水、氯化钠、浓盐酸(ρ=1.18 g/mL)、浓硫酸(ρ=1.84 g/mL)、葡萄糖(分析纯)、乙醇(纯度 95%)、半胱氨酸盐酸盐、*L*-岩藻糖、乳糖(纯度≥98%)、木瓜蛋白酶(食品级, 酶活力≥10.00 万 U/g)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 水符合 GB/T 6682—2008《分析实验室用水规格和试验方法》要求。

1.3　实验方法

1.3.1　样品前处理

为消除含水量差异对理化指标比对的影响, 确保不同加工形态样品在同一基准下进行比较, 本研究对样品进行如下预处理: (1)质构测定用样品。将即食海参样品置于 4 ℃冰箱中缓慢解冻至中心温度一致, 沥干水分备用; 淡干海参样品参照 GB 31602—2015 中的复水方法, 经纯净水预浸泡、去除沙嘴清洗、低温慢火煮制及 4 ℃浸泡涨发

(20 h)等标准化步骤复水后, 沥干备用。(2)理化及营养成分测定用样品。将所有采集的即食及淡干海参样品统一进行真空冷冻干燥处理。干燥后的样品在液氮保护下研磨并通过 60 目筛, 制得均匀粉末, 密封置于干燥器中, 用于后续水分、灰分、蛋白质、脂肪酸及功能成分的测定。实验样品分为 4 个实验组: 大连淡干组(DG-DL)、大连即食组(JS-DL)、福建淡干组(DG-FJ)和福建即食组(JS-FJ), 每个实验组每 3 只独立海参制备为一个混合样, 每组制备 9 个平行样本。

1.3.2 感官评价

采用定量描述分析法(quantitative descriptive analysis, QDA)建立感官评价体系[14]。(1)评价员筛选与培训。参照 GB/T 16291.1—2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则 第 1 部分: 优选评价员》, 从食品相关专业学生中招募并筛选 10 名评价员(男女各半), 针对海参的特征风味(如腥味、鲜甜味)及质地特征进行为期 2 周的实物标准品强度识别培训。(2)评价标准。参考 SC/T 3308—2025 及 GB/T 34747—2024《干海参等级规格》, 构建包含外观(体色、刺形)、气味(腥味、特征香气)、滋味(鲜度)及质地(弹性、咀嚼性)等 4 个维度共 8 个指标的描述词库。(3)评价过程。样品经复水或解冻后, 统一修整为 2.0 cm×2.0 cm 的方块, 置于 45 ℃水浴保温以促进风味释放。样品均采用 3 位随机数字编码, 呈递顺序随机。评价员在独立感官小间内采用 10 分制线性标度法进行评分(0 分代表无/极弱, 10 分代表极强/极优)。评价期间提供纯净水和无盐苏打饼干用于清口, 表 1 为不同产地海参感官的评分表。

1.3.3 质构特性的测定

参考王一帆等[15]的方法并稍作修改。选取海参背部中间平整部位, 修整去疣足后切取 1.5 cm×1.5 cm 的方形试样。使用质构仪(配备 P/36R 柱形探头)进行全质构分析(texture profile analysis, TPA)。测试参数设定为: 测试前、测试中及测试后速度均为 0.5 mm/s, 触发力 5 g, 压缩形变量 30%, 探头停留时间 1 s。每组样品平行测定 12 次, 剔除最大值与最小值后取平均值。

1.3.4 基础理化成分测定

水分含量测定参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》, 即食样品采用直接干燥法, 淡干样品粉末采用减压干燥法测定。灰分含量测定参照 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》, 采用高温灼烧法(550 ℃)测定。粗蛋白含量测定参照 GB 5009.5—2025《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》, 采用凯氏定氮法测定, 氮-蛋白质换算系数取 6.25。粗脂肪含量测定参照 GB 5009.6—2025《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》, 采用索氏抽提法测定。总糖含量测定采用苯酚-硫酸法测定, 以葡萄糖为标准品制作标准曲线。

1.3.5 氨基酸组成分析及营养评价

氨基酸的测定参照 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》, 样品经 6 mol/L 盐酸在 110 ℃下水解 22 h 后, 过滤并定容, 使用全自动氨基酸分析仪进行定性和定量分析。根据测定结果计算总氨基酸含量(total amino acids, TAA)、必需氨基酸/总氨基酸(essential amino acids/total amino acids, EAA/TAA)以及赖氨酸/精氨酸(lysine/arginine, Lys/Arg), 以评价不同产地海参的蛋白质营养质量及潜在药理活性。

表 1 不同产地及加工方式海参的感官评价描述及评分结果

Table 1 Sensory evaluation descriptions and scoring results of *Apostichopus japonicus* from different origins and processing methods

一级指标	二级指标	0~2 分(弱/差)	3~7 分(中等)	8~10 分(强/优)
气味	青草/清香	无明显气味	有淡淡的植物气息	极强的清新黄瓜香或揉碎青草香
	油脂/肉香	无油脂香气, 气味寡淡	略带煮熟肉类的香气	浓郁的坚果油香或醇厚鸡汤香
	海藻/海腥味	基本无腥味	有轻微的海带腥气	强烈的煮海带味、或鱼腥味
外观	体色与光泽	颜色灰白、浅黄, 表面无光泽, 暗淡	颜色呈褐色或深棕色, 光泽度一般	黑褐色或灰黑色, 表面油亮有光泽, 色泽均匀诱人
	疣足(刺)形态	刺短小、圆钝, 或排列稀疏, 甚至有断刺、塌陷	刺长度中等, 甚至有些细长, 排列较整齐	刺粗壮、挺拔、呈圆锥状, 排列致密
质地	弹性	用牙齿轻咬即凹陷, 回弹极慢或不回弹	有一定回弹感, 但不够迅速	回弹迅速有力, 有明显的反馈感
	咀嚼性(咬劲)	一咬即断, 口感软绵, 类似煮过头的面条	需要咀嚼几次才能吞咽, 口感适中	耐嚼, 有韧劲, 在口中咀嚼过程中始终保持整体感
滋味	鲜味	口感平淡如水, 或有苦涩味、异味	有基本的海鲜味道, 鲜味一般	鲜美浓郁, 咀嚼后口腔内有明显的鲜甜回甘, 余味悠长

1.3.6　脂肪酸组成分析及营养评价

脂肪酸组成参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》稍作修改，采用乙酰氯-甲醇法提取脂质并进行甲酯化处理，使用气相色谱仪(gas chromatograph, GC)进行分析。色谱条件依据标准设定，通过与标准品保留时间比对进行定性，面积归一化法定量。计算饱和脂肪酸(saturated fatty acids, SFA)、单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acids, MUFA)、PUFA 含量。并参考王一帆等[15]的方法，计算动脉粥样硬化指数(atherogenic index, AI)和血栓形成指数(thrombogenic index, TI)。AI 计算公式(1)、TI 的计算公式(2)如下:

$$AI=\frac{C12:0+4\times C14:0+C16:0}{\sum MUFA+\sum n\text{-}3\ PUFA+\sum n\text{-}6\ PUFA} \quad (1)$$

$$TI=\frac{C14:0+C16:0+C18:0}{0.5\times\sum MUFA+0.5\times\sum n\text{-}6\ PUFA+3\times\sum n\text{-}3\ PUFA+\frac{\sum n\text{-}3\ PUFA}{\sum n\text{-}6\ PUFA}} \quad (2)$$

式中: C12:0 为十二烷酸(月桂酸)含量, mg/g; C14:0 为十四烷酸(肉豆蔻酸)含量, mg/g; C16:0 为十六烷酸(棕榈酸)含量, mg/g; C18:0 为十八烷酸(硬脂酸)含量, mg/g; ΣMUFA 为 MUFA 总和, mg/g; Σ*n*-6 PUFA 为 *ω*-6 PUFA 总和, mg/g; Σ*n*-3 PUFA 为 *ω*-3 PUFA 总和, mg/g。

1.3.7　海参功能性成分测定

海参多糖测定: 参照 GB/T 44742—2024《海参及其制品中海参多糖的测定》，样品经提取、蛋白酶水解、乙醇沉淀后，采用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)测定其含量。

海参皂苷测定: 参考 GB/T 33108—2016《海参及其制品中海参皂苷的测定》，样品经提取与纯净后采用 HPLC 进行提取与分离测定。

1.4　数据处理

所有实验均平行重复 3 次(除质构分析外)，结果以平均值±标准偏差表示。采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行数据统计分析，利用单因素方差分析结合 Duncan's 多重比较法分析组间差异，显著性水平设定为 $P<0.05$。使 Python3.10 (Matplotlib/Seaborn 库)及 GraphPad Prism 10.4.1 绘制柱状图、热图、相关性热图、HCA 图及 PCA 图谱。

2　结果与分析

2.1　不同产地海参的感官评价分析

采用 QDA 对 4 组样品的感官特征进行解析，结果如图 1 所示。整体而言，产地因素对海参的感官品质具有明显的影响，两地样品在风味、外观及质地维度上展现出截然不同的特征。

在风味维度上，两产地样品呈现出“清香浓郁”与“风味柔和”的分化。即食形态下，大连样品(JS-DL)在“青草香”指标上的评分(4.3)高于福建样品(3.0)，表现出更强的特征性清香风味；而福建样品在该指标上得分较低，清香风味特征相对不明显。淡干复水形态下，差异主要体现在滋味丰度上。大连样品(DG-DL)的鲜味评分高达 6.6 分，远高于

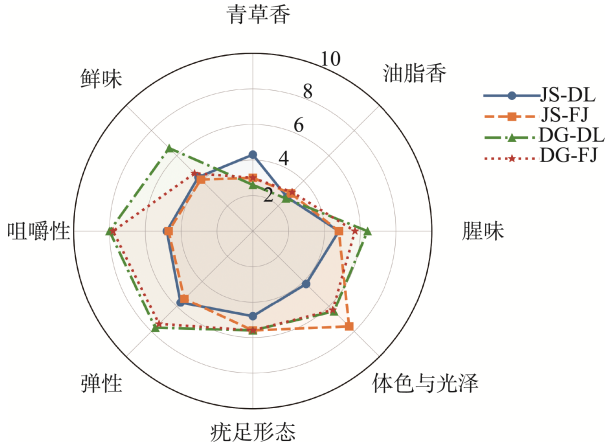


图 1　不同产地海参的感官评价分析

Fig.1　Sensory evaluation analysis of *Apostichopus japonicus* from different origins

福建样品(4.6 分)。这表明在经受同样的干制复水过程后，大连海参释放出更浓郁的鲜美滋味，而福建样品整体滋味较为柔和，且伴有一定程度的腥味感知，这可能与不同产地海参体内呈味氨基酸及挥发性风味物质的组成差异有关[16]。在外观与质地维度上，两产地各具优势，反映了不同的品质侧重。即食形态下，福建样品(JS-FJ)在“体色与光泽”指标上评分突出(7.6 分)，呈现出更深邃、油亮的色泽，这符合当前市场上部分消费者对于即食海参的外观偏好[10,17]；相比之下，大连样品色泽多呈自然的灰褐色。然而，在决定口感的质地指标上，淡干复水后的大连样品(DG-DL)在弹性(7.7)和咀嚼性(8.0)上均处于高位。这说明大连海参在复水后能保持更佳的柔韧性与回弹力，而福建样品在质地上表现出一定的分布差异性，部分样品口感质地与大连样品存在显著差异，这可能与福建样品中部分海参养殖模式的不同有关[12,18]。综上，感官评价结果揭示了不同产地海参的品质定位差异: 福建海参在即食产品的外观色泽上表现出较强的市场适应性，而大连海参在鲜味呈现和质地结构等内在食用品质上具有跨加工形态的稳健特征。

2.2　不同产地海参的质构分析

质构特性是评价海参口感的关键量化指标，其差异本质上反映了体壁胶原纤维微观结构的产地特异性。如图 2 所示，在即食(JS)与淡干复水(DG)两种加工形态下，两产地海参的质构特征整体上呈现明显差异，除即食状态下的弹性未达到统计学显著性水平外，其余质构指标均表现出极显著差异($P<0.01$)。在即食加工形态下，福建样品(JS-FJ)的硬度、胶黏性和咀嚼性均极显著高于大连样品($P<0.01$)。数据显示，福建海参表现出较高的机械强度与咀

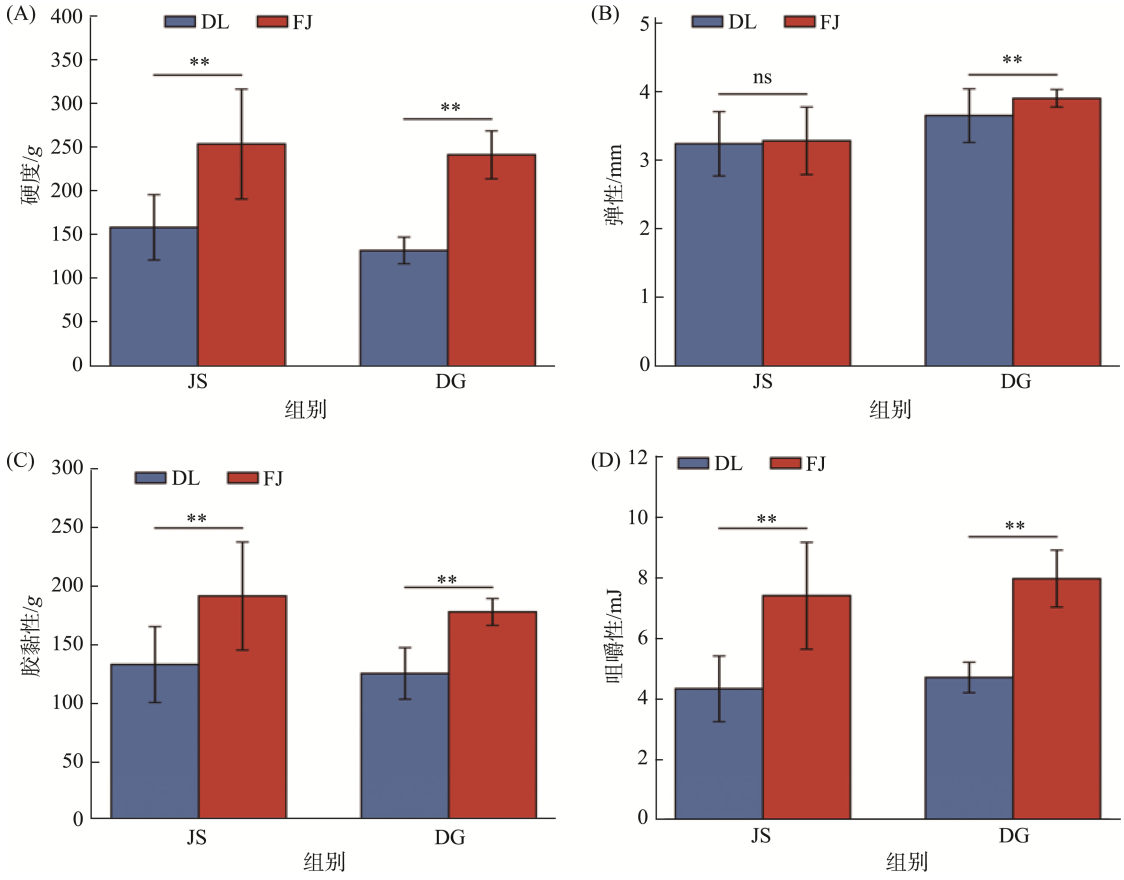
嚼阻力，质地相对硬实；而大连海参(JS-DL)硬度适中，口感更显软糯柔和。两产地在弹性指标上差异未达显著水平(P>0.05)，表明高温高压的即食工艺在一定程度上削弱了原料间的回弹性能差异，但保留了基础硬度的区别[19–20]。在淡干复水形态下，产地带来的结构差异被进一步放大。福建海参在复水后依然维持了较高的硬度与咀嚼性(P<0.01)；且值得注意的是，即食组中无显著差异的弹性指标在此处出现了极显著分化(P<0.01)，大连海参(JS-DL)展现出更优的结构恢复能力与回弹力。

综合分析认为，这种质构差异与两地海参的生长环境及胶原蛋白热稳定性密切相关[21–22]。福建“北参南养”海参因生长周期短、沉积速率快，体壁结构相对粗厚，导致其在两种加工形态下均呈现出“高硬度、高咀嚼性”的质地特征，适合偏好“劲道”口感的消费群体；而大连本土海参得益于低温慢生环境，体壁纤维结构更为细密且热稳定性较好[23]，赋予其跨加工形态的良好柔韧性与适口性。

2.3 不同产地海参的营养指标分析

2.3.1 不同产地海参的基础营养指标分析

基础营养成分是评价海参食用价值的物质基础，受产地环境与加工方式的双重影响[10,12,24]。各组样品的基础理化指标测定结果如表 2 所示。整体分析表明，产地环境影响了蛋白质、糖类及微量营养素的积累模式，使得两地海参在营养构成上呈现出“大连参高蛋白、福建参高总糖”的特征分化。



注: **表示同一种加工方式下，两产地间差异极显著(P<0.01); ns 表示无显著性差异(P>0.05)，图 5 同。

图 2 不同产地海参在不同加工方式下的质构特性对比

Fig.2 Comparison of textural properties of *Apostichopus japonicus* from different origins under different processing modes

表 2 不同产地及加工方式海参的一般营养成分含量

Table 2 Content of general nutritional components in *Apostichopus japonicus* from different origins and processing methods

基础营养指标	JS-DL	JS-FJ	DG-DL	DG-FJ
粗蛋白/(g/kg)	66.47±15.28^{a}	45.90±9.77^{b}	362.09±58.41^{a}	369.54±45.02^{a}
灰分/%	4±1^{a}	4±0^{a}	37±4^{a}	27±4^{b}
粗脂肪/%	3±1^{a}	1±0^{b}	1±0^{b}	2±0^{a}
总糖/(mg/g)	92.57±17.98^{b}	185.67±34.55^{a}	158.19±35.03^{b}	304.82±69.07^{a}
水分/%	89±1^{b}	91±1^{a}	8±1^{a}	9±1^{a}

注: 同一指标同一加工方式组内不同字母表示差异显著(P<0.05)，表 3~4 同。

水分含量主要反映产品的加工状态, 即食组样品水分含量维持在 89%~91%之间, 淡干组经冷冻干燥粉碎后测定, 水分含量控制在 8%~9%, 均符合相应产品标准和前人的研究[3,25], 这为后续基于干基比较其他营养成分提供了可靠基准。

蛋白质作为海参最核心的营养组分, 其含量在即食形态下表现出显著的产地差异(P<0.05)。大连即食海参的粗蛋白含量高达 66.47 g/kg, 显著高于福建样品(45.90 g/kg)。这表明在相同的高温高压即食加工工艺下, 大连本土海参表现出更优的蛋白保留特性。从生物学角度分析, 北方低温海域赋予大连海参较长的生长周期, 可能促使其体壁胶原纤维构建更为致密[26–27], 从而在加工中更能抵抗蛋白的溶出与降解。而在淡干形态下, 两产地粗蛋白含量均在 360 g/kg 左右, 无显著统计学差异(P>0.05), 这可能是淡干工艺中涉及的多次煮制步骤导致了水溶性蛋白的大量流失, 且较高的灰分含量稀释了蛋白质的占比, 从而在一定程度上“均质化”了原料端的差异[28–29]。相比之下, 即食产品的加工路径更短, 更敏锐地捕捉到了两地海参在蛋白本底上的区别。

与蛋白质的分布特征不同, 总糖含量表现出极显著的产地特异性。无论是在即食还是淡干形态下, 福建样品的总糖含量均显著高于大连样品(P<0.05), 数值上约为大连样品的 2 倍。这种“高糖”特征可能与“北参南养”模式下的环境因素密切相关[30–31]: 福建海域水温高, 海参代谢旺盛, 机体倾向于合成更多的结构性多糖或储备糖原以支撑其快速生长; 而大连海参在低温环境下能量则可能更多流向蛋白质合成, 因此, 高总糖含量可视为福建海参显著的产地指纹特征。此外, 产地对脂质与矿物质的丰度亦有显著影响。即食形态下, 大连样品的粗脂肪含量显著高于福建样品(P<0.05), 提示其脂质系统的丰度更高; 淡干形态下, 大连样品的灰分含量亦显著高于福建样品, 推测是大连海参在长生长周期中富集了更多钙、镁等矿物质元素[12], 使其在干制粉末中表现出更高的无机质残留。

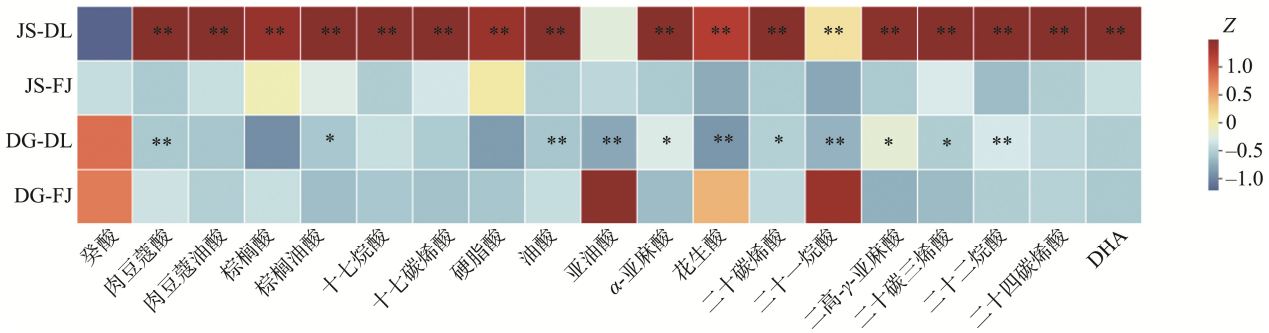
综上所述, 基础理化分析揭示了出两地海参清晰的营养差异: 大连海参以“高蛋白、高矿物质”为特征, 确立了其作为传统滋补品的优质蛋白来源属性; 而福建海参则呈现“高糖”特征, 可能反映了其特定的生长代谢模式。

2.3.2　不同产地海参的脂肪酸组成分析及营养评价

脂肪酸不仅是构成生物膜结构与提供能量的关键物质, 也是表征不同产地样品脂质营养价值差异的重要指标。如图 3 所示, 产地环境显著影响了海参的脂肪酸组成谱系。

在即食形态(JS)下, 大连样品(JS-DL)在多种特征脂肪酸丰度上对比福建样品(JS-FJ)表现出显著的高积累特征(P<0.05)。JS-DL 中高含量的棕榈酸(3.11 mg/g)和棕榈油酸(3.91 mg/g)不仅构成了更充沛的能量储备, 也可能反映了北方海参在低温环境下为维持细胞膜流动性而建立的特定脂质代谢策略[32–33]。最为显著的差异体现在 n-3 PUFA, 特别是 DHA, JS-DL 的含量(1.35 mg/g)约为 JS-FJ 的 6 倍。这种极显著的富集特征主要归因于大连海域较低的水温, 促使海参通过合成更多长链 PUFA 来调节膜脂相变温度[31]; 此外, AI 和 TI 作为评价心血管健康风险的量化工具[10], 数值越低代表健康价值越高。表 3 结果表明, 即食大连样品的 AI 和 TI 均显著低于福建样品(P<0.05), 这与前人的研究一致[34], 且在淡干组中其 TI 依然保持显著优势。

在淡干形态(DG)下, 尽管总脂含量因加工损耗有所下降, 但 n-6 系列脂肪酸的分布差异依然清晰。福建样品(DG-FJ)的亚油酸含量(0.73 mg/g)显著高于大连样品(P<0.05), 并带动其他 n-6 组分相对上浮。这种 n-6 系列的富集倾向可能与“北参南养”模式下的养殖环境及饵料组成有关, 特别是陆源性饲料成分中的植物蛋白引入往往会提升养殖生物体内的 n-6 脂肪酸水平[7,35]。



注: 图中颜色代表标准化后的相对含量(红色为高, 蓝色为低); *表示同一种加工方式下, 该产地样品与另一产地存在显著性差异(P<0.05), **差异极显著(P<0.01), 图 4 同。二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)。

图 3　不同产地及加工方式海参的脂肪酸指纹聚类热图

Fig.3　Cluster heatmap of fatty acid profiles of *Apostichopus japonicus* from different origins and processing methods

表 3 不同产地及加工方式海参的脂肪酸营养评价指标

Table 3 Fatty acid nutritional evaluation indexes of *Apostichopus japonicus* from different origins and processing methods

营养评价指标	JS-DL	JS-FJ	DG-DL	DG-FJ
SFA	10.56±1.73^{a}	4.77±0.48^{b}	3.76±0.30^{b}	4.72±0.82^{a}
MUFA	7.87±1.14^{a}	1.56±0.28^{b}	0.98±0.11^{a}	1.07±0.19^{a}
PUFA	3.93±0.61^{a}	1.28±0.17^{b}	0.94±0.12^{b}	1.38±0.20^{a}
EPA+DHA	1.39±0.30^{a}	0.27±0.05^{b}	0.18±0.03^{a}	0.17±0.02^{a}
n-6/*n*-3	0.124±0.015^{b}	0.324±0.068^{a}	0.331±0.098^{b}	1.331±0.118^{a}
AI	0.503±0.084^{b}	0.877±0.092^{a}	0.934±0.095^{a}	0.992±0.122^{a}
TI	0.282±0.050^{b}	0.542±0.046^{a}	0.416±0.099^{b}	0.885±0.110^{a}

注: 二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)。

脂肪酸营养评价(表 3)进一步揭示了上述组成差异对健康价值的深层影响。即食大连样品的 EPA+DHA 总量(1.39 mg/g)显著优于福建样品(P<0.05), 证实了其作为优质 *n*-3 PUFA 膳食来源的潜质[24]。在脂质健康结构上, JS-DL 的 *n*-6/*n*-3 比值(0.124)显著低于 JS-FJ (0.324) (P<0.05), 且其 AI 和 TI 均处于较低水平, 这表明大连海参的脂质构成更符合现代营养学推崇的“抗炎、护心”模式[1,29]。而在淡干组中, 福建样品的 TI 指数(0.885)及 *n*-6/*n*-3 比值(1.331)相对较高, 提示其脂质营养价值受 *n*-6 系列脂肪酸高贡献率的调控特征。

综上所述, 产地环境影响了海参的脂质品质: 即食大连海参凭借低温适应带来的高 *n*-3 PUFA 积累, 展现出优异的心血管健康价值; 而福建海参(特别是淡干形态)则反映了其快速生长环境下的 *n*-6 脂肪酸代谢特征。

2.3.3 不同产地海参的氨基酸组成分析及营养评价

氨基酸组成是评价海参蛋白质质量与风味特征的核心指标[28]。如图 4 所示, 不同产地海参在两种形态下呈现出截然不同的氨基酸分布特征。

在即食形态(JS)下, 大连样品(JS-DL)显示出显著的“氨基酸全面富集”特征。其谷氨酸、精氨酸和天门冬氨酸含量均高于福建样品(JS-FJ)。其中, JS-DL 中较高的精氨酸含量(0.42 g/100 g)可能与其较长的生长周期密切相关[36], 作为海参体壁胶原蛋白的重要前体, 精氨酸的积累有助于维持胶原纤维的交联度与结构完整性[9], 这与质构分析中大连参在热加工后仍保持优良弹性与回弹力的结果相呼应。同时, 鲜味氨基酸(谷氨酸+天门冬氨酸)的显著优势(JS-DL 1.40 g/100 g、JS-FJ 0.96 g/100 g)表明, 北方长周期的物质积累有利于呈味核苷酸与氨基酸的协同合成, 从而赋予产品更浓郁的本底鲜味, 这也验证了感官评价中大连参鲜味评分较高的结果。

在淡干形态(DG)下, 福建样品(DG-FJ)则表现出更高的氨基酸干基密度。其 TAA 高达 41.84 g/100 g, 显著高于大连样品(33.41 g/100 g) (P<0.05), 且甘氨酸和丙氨酸等甜味氨基酸含量突出, 原因可能归因于产品组分的构成差异: 理化结果显示大连淡干海参的灰分含量显著较高(表 1), 大量存在的无机矿物质在干基质量中占据了较大比例, 从而产生了“稀释效应”, 导致其单位质量内的氨基酸测定值相对降低。反之, 福建淡干海参较高的有机质纯度使其氨基酸含量更为突出。

营养评价指标(表 4)证实了蛋白质质量的稳定性。尽管绝对含量受加工和产地影响波动较大, 但两地海参在两种形态下的 EAA/TAA 比值均稳定在 0.27~0.29 之间, 且 EAA 组成模式高度相似。这说明产地差异主要改变了蛋白质的“积累量与干基占比”, 而非“氨基酸谱的平衡性”, 海参作为优质蛋白源的生物学属性在不同产地间具有高度的稳定性。

综上所述, 氨基酸分析从化学层面诠释了两类海参产地品质差异的本质: 即食大连海参通过长周期的生物积累, 实现了“结构蛋白(精氨酸)”与“风味前体(鲜味氨基酸)”的双重特征; 而福建海参在淡干形态下表现出其低灰分、高有机质占比的产品特征。

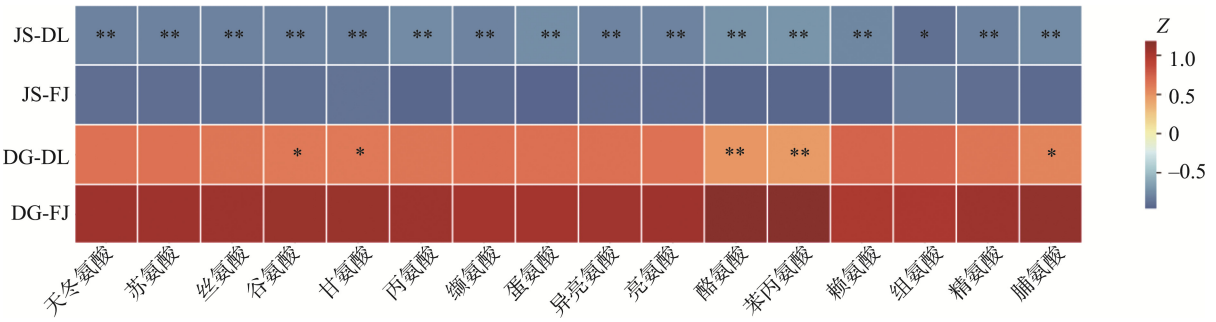


图 4 不同产地及加工方式海参的氨基酸指纹聚类热图

Fig.4 Cluster heatmap of amino acid profiles of *Apostichopus japonicus* from different origins and processing methods

表 4　不同产地加工方式海参的氨基酸营养评价指标

Table 4　Amino acid nutritional evaluation indexes of *Apostichopus japonicus* from different origins and processing methods

营养评价指标	JS-DL	JS-FJ	DG-DL	DG-FJ
TAA	6.21±0.44^{a}	4.01±0.71^{b}	33.41±6.22^{b}	41.84±6.52^{a}
EAA	1.80±0.23^{a}	1.08±0.17^{b}	9.65±1.33^{b}	11.76±1.94^{a}
EAA/TAA	0.29±0.02^{a}	0.27±0.01^{b}	0.29±0.02^{a}	0.28±0.00^{a}
鲜味氨基酸	1.40±0.04^{a}	0.96±0.17^{b}	8.40±1.93^{b}	10.54±1.74^{a}

2.3.4　不同产地海参的功能活性成分分析

海参多糖与海参皂苷是海参发挥免疫调节、抗肿瘤及抗氧化等生物活性的核心物质基础[2,37], 也是区分不同产地海参品质特征的关键化学指标。如图 5 所示, 福建产地海参在两种关键功能成分的积累上均呈现出显著的富集特征。

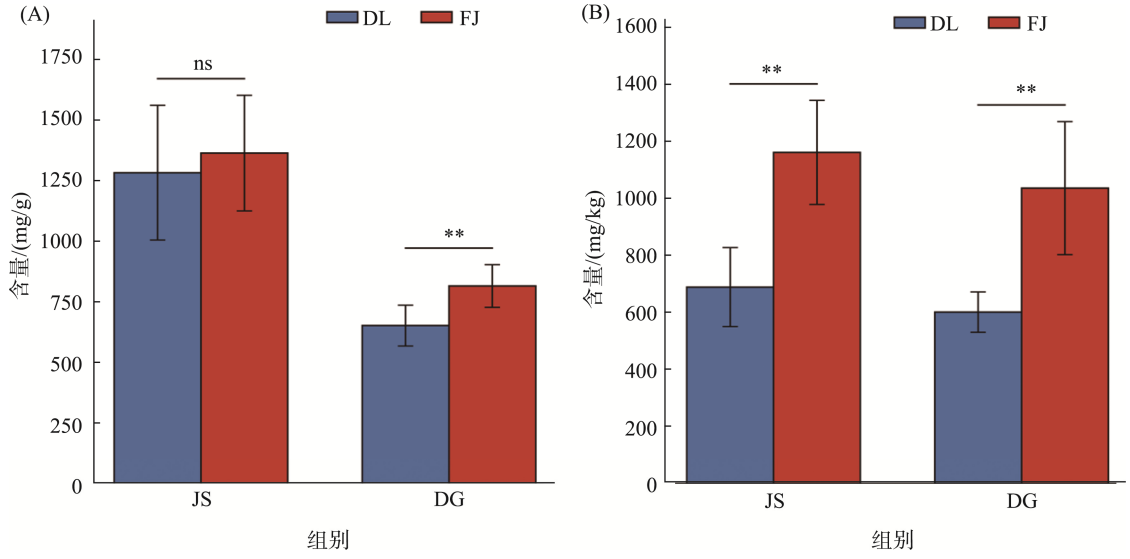
如图 5A 所示, 在海参多糖含量上, 福建海参(FJ)表现出显著的高含量特征。无论是在即食(JS)还是淡干(DG)形态下, 福建样品的多糖含量均高于大连样品(DL), 特别是在淡干组中存在极显著性差异(P<0.01)。这种差异可能因为福建海域水温较高, 海参生长速率快、代谢旺盛, 体壁细胞外基质更新迅速, 机体需合成更多的酸性黏多糖以维持结缔组织的保水性与结构支撑功能[38]。

如图 5B 所示, 海参皂苷的产地分布趋势与多糖保持一致, 福建样品同样表现出较高的积累水平。数据显示, 福建样品在两种加工形态下的皂苷含量均显著高于大连样品(P<0.01)。这表明在“北参南养”模式下, 不同环境在加速海参生长代谢的同时, 并未抑制次生代谢产物的合成, 反而可能因整体生理机能的活跃而促进了皂苷类物质的同步快速富集。

综上所述, 福建海参在海参多糖与海参皂苷的绝对含量上均高于大连海参, 显示出其作为功能活性物质提取原料的巨大潜力; 而大连海参的功能成分积累则相对平稳, 符合其生长周期长、物质沉积致密的代谢特征。

2.4　海参感官品质与营养理化成分的相关性分析

在明确了海参多糖与皂苷等特征性功能成分的产地差异后, 为更全面、客观地揭示海参感官品质形成的物质基础, 本研究筛选出涵盖基础营养物质(粗蛋白、粗脂肪、总糖、灰分)、功能活性成分(海参多糖、海参皂苷)及营养质量指数(EPA+DHA、AI、n-6/n-3、EAA/TAA)的 10 个核心理化指标, 并与感官评价结果进行了皮尔逊相关性分析。结果如图 6 所示, 大连与福建海参独特的感官特征与其各自优势的营养成分高度相关: 海参特有的青草香与 EPA+DHA (r=0.97)及粗脂肪呈极显著正相关, 这解释了大连海参因富含 n-3 PUFA 而呈现出的浓郁清新海藻气息; 而油脂香则与海参皂苷(r=0.93)及总糖含量呈高度正相关, 赋予了福建海参醇厚的风味特征。在质地方面, 弹性和咀嚼性与粗蛋白(r>0.99)及灰分呈极强正相关, 表明结构蛋白的积累量是决定参体硬度与嚼劲的关键, 大连海参在同等加工条件下略高的蛋白保留率使其质地更为紧实[10,26]。上述分析证实, 这 10 个核心指标不仅能够科学解释感官品质的差异来源, 更涵盖了“脂质、总糖、蛋白质、功能性成分”等多个维度的关键信息, 具有极高的代表性和区分度, 因此, 将其作为后续构建海参营养品质综合评价模型的关键变量。



注: (A)海参多糖含量; (B)海参皂苷含量。

图 5　不同产地及加工方式海参的功能活性成分含量对比

Fig.5　Comparison of functional active components content in *Apostichopus japonicus* from different origins and processing methods

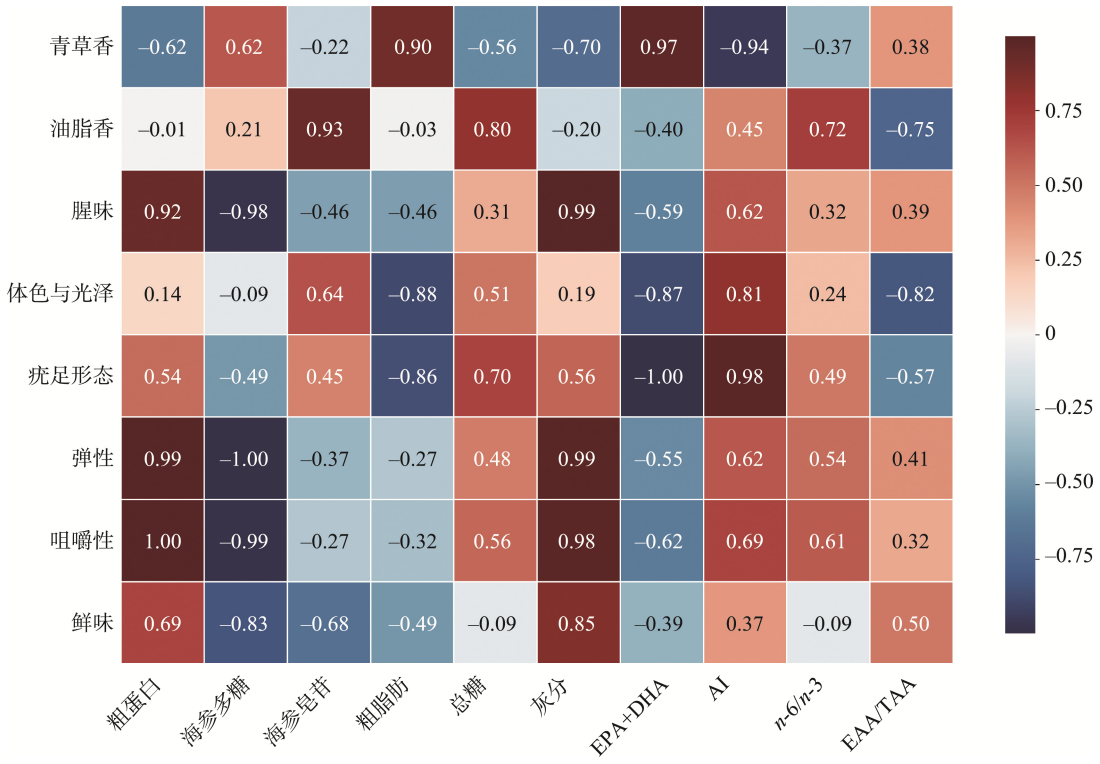


图 6 不同产地及加工方式海参感官指标与核心理化成分的相关性热图

Fig.6 Heatmap of correlation between sensory indicators and core physicochemical components of *Apostichopus japonicus* from different origins and processing methods

2.5 基于核心指标的海参样品层次聚类分析

为验证前文筛选出的 10 个核心理化指标在区分不同产地及加工方式海参方面的有效性，本研究采用系统聚类法对标准化后的数据进行分析。以欧氏距离平方为度量标准，采用沃德法构建聚类树，结果如图 7 所示。结果显示，所有样品在品质指标上表现出高度的组内一致性与组间差异性，准确聚类为与实验分组(JS-DL、JS-FJ、DG-DL、DG-FJ)完全对应的 4 大簇，实现了对样品类别的 100%正确区分。观察聚类树的拓扑结构可知，样品首先在第一层级被分为“即食”与“淡干”两大支，这表明加工方式带来的水分去除与组分浓缩是改变海参理化性质的主要物理驱动力[21,39–40]；随后在同一加工方式内部，大连与福建产地的样品进一步分聚为独立的小簇，证实了在剔除加工影响后，产地环境是决定海参营养品质微观特征的关键因素。综上所述，这 10 个核心指标具有极高的分辨效能，不仅能有效识别加工方式，更有可能溯源产地，为后续基于 PCA 的品质综合评价提供了可靠的变量基础。

2.6 不同产地海参主成分分析

为综合解析不同产地海参在两种加工方式情境下多项营养指标的整体差异特征，在前述相关性分析基础上，对 10 项营养指标进行 PCA，以降低变量维度并提取主要信息轴[41]。主成分特征值及方差贡献率见表 5。由表 5 可知，根据特征值大于 1 的原则，共提取了 3 个主成分。其中，PC1 特征值为 5.17，方差贡献率为 49.97%；PC2 特征值为 1.89，贡献率为 18.31%；PC3 特征值为 1.24，贡献率为 11.99%。前 3 个主成分的累计方差贡献率达到 80.27%，表明这 3 个综合变量已涵盖了原始数据绝大部分的变异信息，能够充分代表海参样品的综合营养品质特征，故选取前 3 个主成分进行后续综合评价分析具有统计学合理性[42]。

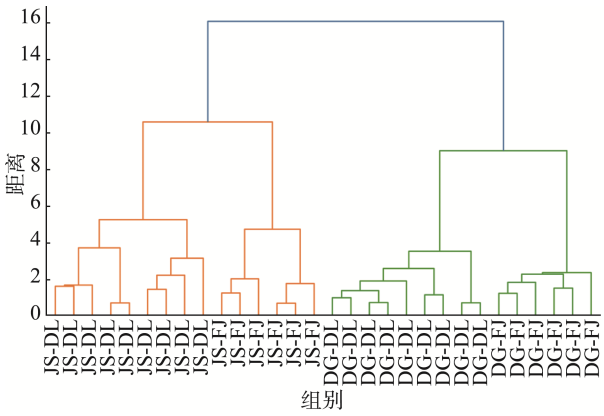


图 7 基于 10 个核心营养理化指标的海参样品层次聚类树状图

Fig.7 Hierarchical clustering dendrogram of *Apostichopus japonicus* samples based on 10 core nutritional and physicochemical indicators

表 5　PCA 的特征值、方差贡献率及累积贡献率(%)
Table 5　Eigenvalues, variance contribution rates and cumulative contribution rates of PCA (%)

主成分	PC1	PC2	PC3	PC4
特征值	5.17	1.89	1.24	0.84
方差贡献率/%	49.97	18.31	11.99	8.09
累积贡献率/%	49.97	68.28	80.27	88.37

表 6 展示了各营养指标在 3 个主成分上的载荷情况, 结合图 8 的 PCA 双标图分布, 可明确各主成分的生物学含义。第一主成分: 主要反映了“蛋白质与脂质的拮抗关系”。AI (0.40)、粗蛋白(0.39)和灰分(0.38)呈较高正载荷, 而 EPA+DHA (–0.39)和海参多糖(–0.33)呈负载荷。这表明 PC1 正向主要代表了以结构蛋白和无机质为主的干物质积累, 负向则代表了功能性脂质和多糖的保留。第二主成分: 主要由海参皂苷(0.55)主导, 且与 EAA/TAA (–0.49)呈显著负相关, 可定义为“功能活性因子”, 反映了皂苷等次生代谢物的积累水平。第三主成分: 粗脂肪(0.68)和 *n*-6/*n*-3 (0.49)具有极高的正载荷, 主要反映了脂质的总量及脂肪酸的平衡状况。

表 6　核心营养指标在各主成分上的载荷矩阵
Table 6　Loading matrix of core nutritional indicators on principal components

主成分	PC1	PC2	PC3
粗蛋白	0.39	–0.27	0.20
海参多糖	–0.33	0.27	–0.15
海参皂苷	0.05	0.55	–0.03
粗脂肪	–0.28	0.03	0.68
总糖	0.33	0.31	0.30
灰分	0.38	–0.35	0.03
EPA+DHA	–0.39	–0.09	0.28
AI	0.40	0.14	–0.20
n-6/*n*-3	0.31	0.27	0.49
EAA/TAA	–0.06	–0.49	0.15

注: 特征向量绝对值越大, 表示该指标对相应主成分的贡献越大; 正负符号表示指标与主成分之间的正负相关关系。

在 PCA 降维结果基础上, 进一步构建海参营养品质综合评价模型。根据表 6 所示的主成分方差贡献率, 选取 PC1、PC2 和 PC3 作为综合评价的核心因子, 并以各主成分的方差贡献率为权重, 为确保综合得分(F)与品质呈正相关, 根据载荷正负方向对公式进行了校正(如 F_2 和 F_3 采用减法修正), 得到的最终评价公式(3)如下:

$$F=\frac{0.4997\times F_1-0.1831\times F_2-0.1199\times F_3}{0.8027} \quad (3)$$

式中: F_1、F_2 和 F_3 分别表示样品在 PC1、PC2 和 PC3 上的得分; F 为综合营养品质得分。

基于 PCA 的结果, PCA 双标图的空间分布(图 8)清晰地揭示了不同产地海参在营养组成上的“风格特异性”, 而非单一维度的品质优劣之分。PCA 载荷图揭示了造成这种组间分离的物质基础: 大连产地海参(无论是淡干还是即食)在 PCA 图上主要向 EPA+DHA、EAA/TAA 及粗蛋白等指标的矢量方向聚集, 表明其优势主要体现在“优质蛋白与脂质营养”上。这与大连海域水温较低、海参生长周期较长, 有利于 PUFA 及结构蛋白的积累有关。相比之下, 福建“北参南养”海参则在海参多糖、海参皂苷及总糖等指标(通常为 PC2 的主要载荷项)上表现出显著的富集趋势。这说明福建海参在“功能性活性成分”方面具有独特的利用价值, 这可能与其在高温快速生长环境下, 机体加强基础代谢与防御性次生代谢的调控机制有关。

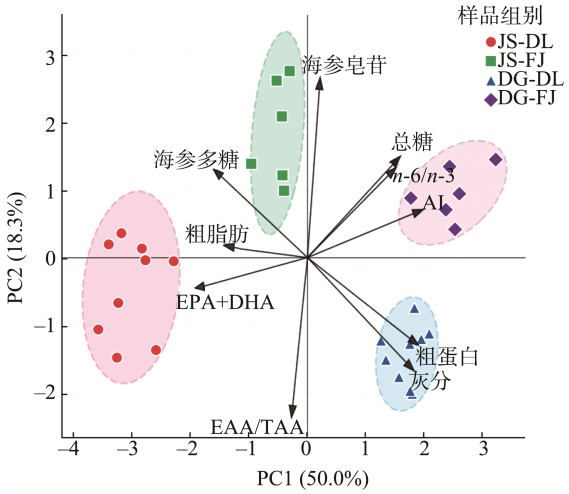


图 8　不同产地及加工方式海参营养品质的 PCA 双标图
Fig.8　Biplot of PCA for nutritional quality of *Apostichopus japonicus* from different origins and processing methods

由以上结果可知, 本研究的 PCA 综合评价模型证实: 产地环境并未造成绝对的品质断层, 而是塑造了各具特色、互为补充的营养特征。两地海参的整体营养品质均维持在较高水平, 但侧重点不同。因此, 建议未来的市场推广应从单一的产地导向, 转向基于消费者特定营养需求的精准定位。

3　结　论

本研究以大连本土养殖与福建“北参南养”模式下的海参为对象, 涵盖即食与淡干两种主流加工形态, 通过理化全谱检测与多变量统计分析, 系统揭示了产地环境是重塑海参营养成分特征的首要驱动力。研究表明, 大连海参在脂质品质与蛋白质质量上的显著优势(高 EPA+DHA、低 AI 指数及高蛋白保留率), 在生物学机制上符合海洋生物应对低温环境的“细胞膜顺应性适应”理论及慢速生长周期

的氮储留规律。低温胁迫可能促使海参上调膜脂中不饱和脂肪酸的比例以维持流动性，这种特定的物质基础不仅使其脂肪酸谱更契合心血管健康需求，更赋予了其肉质紧实、弹性更强的物理质地。相关性分析进一步证实，大连海参显著的清新“青草香”正是源于其丰富的 *n*-3 PUFA (EPA+DHA)氧化裂解产生的挥发性羰基化合物。相比之下，福建“北参南养”海参表现出的海参多糖、皂苷及总糖富集特征，则是南方高温环境下代谢激奋效应与高密度养殖环境胁迫诱导的化学防御机制共同作用的结果。这种次生代谢产物的防御性积累，虽在一定程度上改变了脂质构成，但却形成了其独特的醇厚“油脂香”，并赋予了其更突出的免疫调节物质基础。这种感官表型与化学组分的高度耦合，证实了“环境-代谢-品质”之间的内在关联。基于筛选出的 10 个核心理化指标构建的 PCA 综合评价模型，清晰界定了上述特征差异的物质基础：大连海参向“结构营养/脂质型”指标聚集，而福建海参向“功能活性型”指标聚集。这一结果有力证实，“北参南养”模式并非存在绝对的品质优劣之分，而是形成了与北方模式互补的营养特征。综上所述，本研究从化学物质基础层面结合化学计量分析，客观阐明了“北参南养”模式导致的品质差异化规律。建议未来的产业指导应打破单一的产地品质优劣二元论，转向基于品质基础的精准定位策略——即推荐大连海参作为益智健脑与心血管健康的膳食补充源，而定位福建海参为免疫调节与滋补功能主导的加工原料。这一科学结论为消费者理性选购、养殖业因地制宜以及海参产品的精深加工与差异化定价提供了重要的理论依据，有助于推动海参产业向精细化、高质量方向发展。

参考文献

[1] CHEN L, CHEN LY, WANG XY, *et al*. Physicochemical properties and bacterial diversity of sediment in sea cucumber culture ponds under high summer temperatures [J]. Aquaculture Research, 2023, 2023: 1–16.

[2] 巨盛楠, 徐慧静, 王玉明, 等. 海参皂苷 Holothurin A 和 Echinoside A 对肥胖小鼠尿酸代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 385–391.
JU SN, XU HJ, WANG YM, *et al*. Effects of Holothurin A and Echinoside A from sea cucumber on uric acidmetabolism in obese mice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 385–391.

[3] 郗亚凡, 林海生, 曹文红, 等. 三种南海礁栖海参体壁营养成分分析[J]. 广东海洋大学学报, 2023, 43(2): 113–119.
XI YF, LIN HS, CAO WH, *et al*. Analysis of nutrient composition of three South China Sea reef-dwelling sea cucumbers in the body wall [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2023, 43(2): 113–119.

[4] 中华人民共和国农业部渔业管理. 2025 年中国渔业统计年鉴[Z]. 中国农业出版社.
Fishery Management of the Ministry of Agriculture of the People’s Republic of China. 2025 China fishery statistical yearbook [Z]. China Agricultural Press.

[5] KIEW PL, DON MM. Jewel of the seabed: Sea cucumbers as nutritional and drug candidates [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2012, 63(5): 616–636.

[6] 庞秋婷, 刘宁, 张云龙, 等. 中国海参产业链发展现状[J]. 科技和产业, 2024, 24(21): 192–197.
PANG QT, LIU N, ZHANG YL, *et al*. Current development status of the sea cucumber industry chain in China [J]. Science Technology and Industry, 2024, 24(21): 192–197.

[7] 黄强, 李水根, 刘燕飞, 等. 霞浦海参两种不同养殖模式综合效益分析[J]. 中国水产, 2025(10): 71–73.
HUANG Q, LI SG, LIU YF, *et al*. Comprehensive benefit analysis of two different cultivation modes of Xiapu sea cucumber [J]. China Fisheries, 2025(10): 71–73.

[8] 蒋冰雪, 张晓梅, 何晓霞, 等. 商品海参溯源分析技术研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 309–318.
JIANG BX, ZHANG XM, HE XX, *et al*. Recent advances in analytical techniques for the traceability of commercial sea cucumber [J]. Food Science, 2021, 42(13): 309–318.

[9] 常耀光, 刘艳艳, 石菲菲, 等. 海参在加工过程中的组分与食品结构变化[J]. 水产学报, 2022, 46(7): 1129–1142.
CHANG YG, LIU YY, SHI FF, *et al*. Changes in components and food structure of sea cucumbers during processing [J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(7): 1129–1142.

[10] 傅志宇, 李龙, 于笛, 等. 不同市售即食海参营养品质差异分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(11): 38–47.
FU ZY, LI L, YU D, *et al*. Nutritional quality difference analysis of various commercial ready-to-eat sea cucumbers [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(11): 38–47.

[11] 刘小芳. 刺参营养成分的地域性差异分析及其磷脂的活性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
LIU XF. Regional differences in nutrient composition of *S. spinosa* and its phospholipid activity [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

[12] 彭吉星, 赵新楠, 宋冬茹, 等. 不同养殖模式和产地刺参营养功能成分比较分析[J]. 中国渔业质量与标准, 2023, 13(2): 1–10.
PENG JX, ZHAO XN, SONG DR, *et al*. Comparative analysis of nutritional functional components of stichopus in different culture modes and production areas [J]. China Fisheries Quality and Standards, 2023, 13(2): 1–10.

[13] ZHU X, WANG J, RONG X, *et al*. High-throughput based detection of eukaryotic pathogens for sea cucumber in dalian costal area [J]. Aquaculture Reports, 2025, 41: 102715.

[14] 王义轩, 于笛, 傅志宇, 等. 不同热处理方式对工厂化养殖海参营养品质变化影响研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(3): 106–114.
WANG YX, YU D, FU ZY, *et al*. Effects of different heat treatment methods on the changes of nutritional quality of factory-farmed sea cucumbers [J]. China Food Additives, 2022, 33(3): 106–114.

[15] 王一帆, 赵影, 时佳凝, 等. 4 种市售即食海参质构特性及营养品质综合评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(8): 263–272.
WANG YF, ZHAO Y, SHI JN, *et al*. Analysis and evaluation of texture and nutritional value of four kinds of ready-to-eat sea cucumber products [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(8): 263–272.

[16] 汪子涵, 安俊文, 郑杰, 等. 不同泡发方式对海参品质特性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(4): 135–141.
WANG ZH, AN JW, ZHENG J, *et al*. Effects of different soaking methods on the quality characteristics of sea cucumbers [J]. China Food Additives, 2023, 34(4): 135–141.

[17] RACHITHA P, RAGHAVENDRA VB, PAL A, *et al*. Technological and biofunctional potential of sea cucumber-derived macromolecular carbohydrates and proteins-a review [J]. International Journal of

Biological Macromolecules, 2025, 318: 144428.

[18] 李银塔, 李钰金, 陈英乡, 等. 即食鲜海参生产工艺研究[J]. 肉类研究, 2010(6): 78–81.
LI YT, LI YJ, CHEN YX, *et al*. Research on the production technology of ready-to-eat fresh sea cucumber [J]. Meat Research, 2010(6): 78–81.

[19] 郑明静, 周美龄, 陈妮, 等. 超高压处理对海参组织结构及品质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(4): 187–191, 210.
ZHENG MJ, ZHOU ML, CHEN N, *et al*. Research on the effects of ultra-high pressure treatment on the tissue structure and quality of sea cucumbers [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(4): 187–191, 210.

[20] 葛小通, 王红丽, 尹明雨, 等. 冷冻即食海参质构特性指标的相关性研究[J]. 中国食品学报, 2023, 23(1): 326–334.
GE XT, WANG HL, YIN MY, *et al*. Correlation study on quality indexes of frozen ready-to-eat sea cucumber texture characteristics [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(1): 326–334.

[21] FUKUNAGA T, MATSUMOTO M, MURAKAMI T, *et al*. Effects of soaking conditions on the texture of dried sea cucumber [J]. Fisheries Science, 2004, 70(2): 319−325.

[22] 穆琳. 加工对海参营养和功能成分的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2016.
MU L. Research on the nutrition and functional components of sea cucumbers [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2016.

[23] LI M, QI Y, MU L, *et al*. Effects of processing method on chemical compositions and nutritional quality of ready-to-eat sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(2): 755–763.

[24] 杨林彤, 黄栋, 周建华, 等. 海参营养价值与主要功效成分的研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(2): 168–172.
YANG LT, HUANG D, ZHOU JH, *et al*. Research progress on the nutritional value and major active components of sea cucumber [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(2): 168–172.

[25] HAIDE MS, SULTANA R, JAMIL K, *et al*. A study on proximate composition, amino acid profile, fatty acid profile and some mineral contents in two species of sea cucumber [J]. Journal of Animal and Plant Sciences, 2015, 25(1): 168−175.

[26] 郝梦甄, 胡志和. 超高压和盐渍泡发处理海参的质构和功能成分比较研究[J]. 食品科学, 2013, 34(5): 115–119.
HAO MZ, HU ZH. Comparative study on the texture and functional components of sea cucumbers treated with ultra-high pressure and saline soaking [J]. Food Science, 2013, 34(5): 115–119.

[27] 王寿权, 员冬玲, 尹凤交, 等. 海参及其加工废液基本化学成分分析及蛋白质营养评价[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(14): 150–154.
WANG SQ, YUAN DL, YIN FJ, *et al*. Analysis of basic chemical components in sea cucumber and its processing waste liquor and protein nutritional evaluation [J]. Food Research and Development, 2019, 40(14): 150–154.

[28] 李烨. 干海参质量评价关键指标的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
LI Y. Research on key indicators for quality evaluation of dried sea cucumber [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.

[29] 井月欣, 王共明, 刘玉成, 等. 即食海参的工艺优化及其营养品质研究[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(10): 89–98.
JING YX, WANG GM, LIU YC, *et al*. Optimization of the process for ready-to-eat sea cucumber and research on its nutritional quality [J]. China Food Additives, 2025, 36(10): 89–98.

[30] 丁昊翔, 唐美君, 姜晓东, 等. 中国主要产地“六月黄”中华绒螯蟹的营养品质比较[J]. 中国水产科学, 2022, 29(7): 1052−1063.
DING HX, TANG MJ, JIANG XD, *et al*. Comparative study of the nutritional quality of outseason crab at lunar June (*Eriocheir sinensis*) from major Chinese production areas [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(7): 1052−1063.

[31] DAS A, HOSSAIN A, BURKE H, *et al*. Variations in nutritional and bioactive properties of North Atlantic Sea cucumber (*Cucumaria frondosa*): Role of seasonality, location, and processing [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 148: 108207.

[32] VENTURA M, MONFERRER NL, LONG M, *et al*. Modulation of membrane and reserve fatty acids of the thraustochytrid *Aurantiochytrium mangrovei* by light and temperature culture conditions [J]. Lipids, 2025, 60(6): 491–505.

[33] MINAMI Y, B. GOWDA SG, GOWDA D, *et al*. Regio-specific lipid fingerprinting of edible sea cucumbers using LC/MS [J]. Food Research International, 2024, 184: 114253.

[34] KANG J, WANG H, LI Y. An explainable machine learning for geographical origin traceability of mussels (*Mytilus edulis*) based on elemental and isotopic profiling [J]. Food Chemistry, 2023, 424: 136512.

[35] KEMSAWASD V, JAYASENA V, KARNPANIT W. Incidents and potential adverse health effects of serious food fraud cases originated in Asia [J]. Foods, 2023, 12(19): 3522.

[36] OMMATI MM, HEIDARI R, GHANBARINEJAD V, *et al*. Taurine treatment provides neuroprotection in a mouse model of manganism [J]. Biological Trace Element Research, 2019, 190(2): 384–395.

[37] 朱玉婕, 田迎樱, 戴宇峰, 等. 海参磷脂型 epa 对血清及肝脏脂肪酸组成的改善作用[J]. 中国海洋药物, 2018, 37(2): 45–51.
ZHU YJ, TIAN YY, DAI YF, *et al*. Improvement of serum and liver fatty acid composition by sea cucumber phospholipid-type EPA [J]. China Journal of Marine Drugs, 2018, 37(2): 45–51.

[38] ZHAO G, ZHAO W, HAN L, *et al*. Metabolomics analysis of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) in different geographical origins using UPLC-Q-TOF/MS [J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127453.

[39] 白颖, 冯丁丁, 浦源, 等. 海参低温贮藏过程中品质与理化性质的变化[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 208–214.
BAI Y, FENG DD, PU Y, *et al*. Changes in quality and physicochemical properties during low-temperature storage of sea cucumbers [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(1): 208–214.

[40] 林雅文, 李艾青, 谭卓弘, 等. 干燥条件对干海参复水动力学及品质的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(2): 280–289.
LIN YW, LI AIQ, TAN ZH, *et al*. Effect of drying conditions on the rehydration kinetics and quality of dried sea cucumber [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(2): 280–289.

[41] 秦力悦, 石萍萍, 李荣辉, 等. 基于主成分分析和聚类分析的烘烤类澳洲坚果果仁综合品质评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 331–341.
QIN LY, SHI PP, LI RH, *et al*. Comprehensive quality evaluation of roasted Australian nut kernels based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 331–341.

[42] WANG J, WANG X, LI J, *et al*. Effects of dietary coconut oil as a medium-chain fatty acid source on performance, carcass composition and serum lipids in Male broilers [J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2014, 28(2): 223–230.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)